



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Off nl ungsschrift  
⑩ DE 42 06 499 A 1

⑤1 Int. Cl.<sup>8</sup>:  
**G 01 B 11/14**  
G 01 B 15/00  
G 01 B 11/24  
G 01 C 3/08  
B 23 Q 17/24

②1 Aktenzeichen: P 42 06 499.6  
②2 Anmeldetag: 2. 3. 92  
②3 Offenlegungstag: 16. 9. 93

DE 42 06 499 A 1

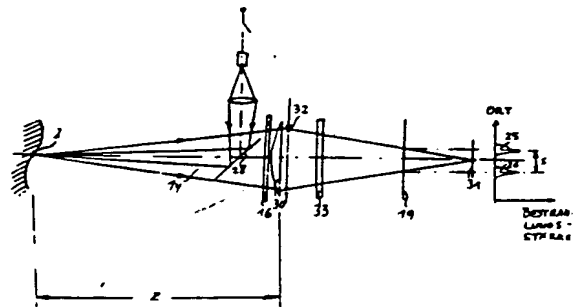
⑦1 Anmelder:  
Häusler, Gerd, Prof. Dr., 8520 Erlangen, DE

⑦2 Erfinder:  
gleich Anmelder

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Verfahren und Vorrichtung zur hochgenauen Messung von sich ggf. verändernden Abständen zwischen einem Objekt, z. B. einem eingespannten Werkstück, und einem Bezugspunkt

⑤7 Es wird ein Verfahren und eine Vorrichtung beschrieben, mit der der Abstand eines leuchtenden Punktes von der Vorrichtung sehr genau gemessen werden kann. Die hohe Genauigkeit wird erzielt, indem der leuchtende Punkt zu inkohärenter Strahlung angeregt wird und dadurch Speckle-effekte vermieden werden. Durch eine geeignete Geometrie der Vorrichtung wird erreicht, daß das Entfernungssignal unabhängig von der Form des leuchtenden Punktes wird.



DE 42 06 499 A 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur hochgenauen Messung von sich ggf. verändernden Abständen zwischen einem Objekt, z. B. einem eingespannten Werkstück, und einem Bezugspunkt.

Genaue Entfernungsmessung ist besonders beim automatisierten Messen, Prüfen und Erkennen wichtig, weil damit die dreidimensionale Gestalt oder Form von Gegenständen erfaßt werden kann, wenn das Objekt mit dem Abstandssensor abgetastet wird. Speziell im Maschinenbau sind Genauigkeiten besser als 10 µm gefragt.

Es sind verschiedene Meßprinzipien bekannt, die sich gliedern lassen in Interferometrie, Laufzeitmethoden, Fokussuche, Triangulation (vgl. z. B. T. C. Strand, "Optical three-dimensional sensing for machine vision," Opt. Eng. 24, 33 (1985)). Da Interferometrie für optisch diffus streuende (raue, geschliffene, gefräste, gedrehte, gegossene...) Oberflächen, wie sie im Maschinenbau vorkommen, nicht geeignet ist und Laufzeitmessung zu ungenau ist, basieren die meisten kommerziell verwendeten Abstandssensoren auf Triangulation oder Fokussuche. Diese beiden Methoden sind physikalisch sehr ähnlich und unterliegen auch den gleichen physikalischen Beschränkungen. Deshalb werden sie im folgenden gemeinsam behandelt. Der am meisten verbreitete Abstandssensor basiert auf dem in Fig. 1 schematisch dargestellten Prinzip:

Es wird ein Leuchtfleck 2 als Bild der Lichtquelle 1 in Richtung der Beleuchtungsachse 3 auf das Objekt 4 projiziert. Das vom Objekt kohärent gestreute Licht wird in einem Meßkopf 5 in Richtung der Beobachtungsachse 6, die unter dem Triangulationswinkel  $\Theta$  gegen die Beleuchtungsachse geneigt ist, im Leuchtfleck-Bild 7 auf dem Photoempfänger 8 gesammelt. Die Entfernung wird durch Triangulation bestimmt. Das heißt, eine Veränderung der Entfernung der Objektoberfläche um eine Strecke  $\Delta z$  bewirkt eine laterale Verschiebung  $\Delta x$  des Leuchtfleck-Bildes zur Position 8.

Die Genauigkeit dieser Abstandsbestimmung wird durch die Genauigkeit der Positionsbestimmung des Leuchtfleckbildes 7,9 gegeben. Es stellt sich heraus, daß diese Genauigkeit bei den oben beschriebenen Sensoren durch physikalische Grenzen fundamental beschränkt ist. Die Ursache liegt in der statistischen "Speckle-Struktur" des Leuchtfleckbildes, wie es in Fig. 2 wiedergegeben ist. Diese Struktur, die durch die jeweilige zufällige Mikrotopografie der Objektoberfläche bestimmt ist, gestattet die Lokalisation des Beleuchtungsfleck-Bildes nur mit statistischer Unsicherheit, und damit auch nur die Abstandsbestimmung mit statistischer Unsicherheit. Diese Zusammenhänge und mögliche Auswege sind u. a. in den DE-A 36 14 332, Wo 89/11 630, DE-A 3 70 31 882 beschrieben.

Ferner ist es aus (G. Häusler, "About fundamental limits of three-dimensional sensing", 15th Congress of the Int. Com. for Optics, Ed. F. Lanzl, 352 (1990)) bekannt, daß alle Verfahren, die mit kohärentem Licht arbeiten, an die o. g. physikalische Grenze der Genauigkeit stoßen, die durch die Wechselwirkung von kohärentem Licht mit den im Maschinenbau üblichen rauen Flächen bewirkt wird. Die am Objekt gestreute Welle weist eine räumlich variierende Phasen- und Intensitätsfluktuation auf, die eine Lokalisation des Streuflecks über eine bestimmte Genauigkeitsgrenze hinaus verhindert. Diese Genauigkeitsgrenze ist im wesentlichen durch die Beobachtungsapertur gegeben:

$$\sigma x \approx \lambda / \sin u \quad (1)$$

Dabei bedeutet  $\sigma x$  die statistische Unsicherheit (Standardabweichung) der lateralen Lokalisation des Leuchtflecks,  $\lambda$  ist die Wellenlänge und  $\sin u$  ist die Beobachtungsapertur. Bei Triangulationsmessungen, zwischen denen ein Triangulationswinkel  $\Theta$  zwischen der Achse der Beleuchtung und der Achse der Beobachtung benutzt wird, führt die laterale Lokalisationsunsicherheit zu einer Meßunsicherheit  $\sigma z$  bezüglich der Entfernung:

$$\sigma z \approx \lambda / (\sin u \cdot \sin \Theta) \quad (2)$$

Bei Verfahren, die auf Fokussuche beruhen, errechnet sich die Meßunsicherheit aufgrund von Speckle nach Gl. (3):

$$\sigma z \approx \lambda / \sin^2 u, \quad (3)$$

was der klassischen Schärftiefe nach Rayleigh entspricht.

Die Gleichungen (2) und (3) sagen im wesentlichen aus, daß mit kohärenter Strahlung für eine geringe Meßunsicherheit  $\sigma z$  eine große Beobachtungsapertur  $\sin u$  notwendig ist und/oder ein großer Triangulationswinkel  $\Theta$ . Für eine geforderte Meßunsicherheit unter 10 µm führt dies zu unpraktikablen Winkeln  $u, \Theta$ . Beispielsweise, für eine Wellenlänge  $\lambda = 0,8 \mu\text{m}$  wird für eine Meßgenauigkeit von  $\sigma z \approx 10 \mu\text{m}$  bei Fokussuche eine Apertur von  $\sin u \approx 0,28$  benötigt, also ein Aperturwinkel von fast  $30^\circ$ . Ein solcher Winkel ist für mikroskopische Anwendungen eventuell praktikabel, für makroskopische Dimensionen führt er jedoch zu sehr großen Linsen. Überdies stört die Abschattung der Randstrahlen, d. h. man kann nicht in Löcher hineinsehen.

Es ist noch wesentlich, zwischen Genauigkeit und Auflösung zu unterscheiden: Richtet man einen oben beschriebenen Sensor auf ein Objekt, so wird der Sensor eine Entfernung anzeigen, die im Rahmen der durch die Gleichungen (2, 3) angegebenen Toleranz genau ist. Verfährt man das Objekt um eine kleine Strecke in Richtung auf den Sensor, so wird die entsprechende Entfernungsänderung angezeigt. Der Sensor zeigt also eine durchaus gute Entfernungsauflösung. Dies gilt jedoch nur für Objektverschiebungen, die klein gegen die Schärftiefe der Beobachtung sind, da nur dann die Specklestruktur erhalten bleibt.

Wenn aber ein Objekt mit einer völlig ebenen (aber rauen) Objektoberfläche parallel zur Oberflächenebene verschoben wird, sollte der Sensor unabhängig von der Verschiebung die gleiche Entfernung anzeigen. Dies ist jedoch nicht der Fall. Das Sensorsignal täuscht das Vorhandensein einer "gebirgigen" Oberfläche vor, wie in Fig. 3 wiedergegeben, mit einer Standardabweichung der Höhe, die durch Gl. (2) bzw. (3) gegeben ist. Diese Standardabweichung  $\sigma z$  ist nicht die Rauhtiefe der Objektoberfläche, wie gelegentlich behauptet wird.  $\sigma z$  hat überhaupt nichts mit der Mikrotopografie der Oberfläche zu tun, sondern wird ausschließlich durch eine Apertureigenschaft, die Beobachtungsapertur, bestimmt, und kann ein Vielfaches der Objekt-Rauhtiefe betragen.

Um Speckle und damit statistische Meßfehler zu vermeiden, sollte die zur Messung verwendete Strahlung, die die Entfernung codiert, weitgehend räumlich inkohärent sein. Dies läßt sich aber nicht erreichen, indem man eine (kleine) inkohärente Punktquelle, z. B. einen Quecksilber-Höchstdruckbogen, auf das Objekt abbildet. Denn nach der Kohärenztheorie ist nach der Abbil-

dung die Breite der räumlichen Kohärenzfunktion auf dem Objekt gleich der Breite des Beugungsbildes (Punktbildes) der beleuchtenden Optik (M. Born, E. Wolf, "Principles of Optics," Pergamon Press, New York, 1970). Damit ist das Bild einer auch inkohärenten sehr kleinen Quelle immer räumlich kohärent.

Weitgehende räumliche Inkohärenz im Leuchtfleck 2 ließe sich also nur erreichen, wenn die auf das Objekt abgebildete Lichtquelle 1 groß ist, so daß der Leuchtfleck groß gegen das Punktbild der Projektionsoptik ist. Ein solches Vorgehen hat aber den Nachteil, daß man auf dem Objekt keinen kleinen Punkt mehr durch Beleuchtung adressiert, sondern einen großen Bereich, so daß die laterale Auflösung reduziert wird. Außerdem ist die Lokalisation des Leuchtfleck-Bildes auf dem Photoempfänger nur mit geringerer Genauigkeit möglich, wenn das Leuchtfleckbild groß ist. Es wurde auch versucht (vgl. DE-A 36 14 332 und W. Dremel, G. Häusler, M. Maul, "Triangulation with large dynamical range", Optical Techniques for Industrial Inspection, Ed. G. Paolo, Proc. SPIE 665, 182 (1986)), mit einem Laser zu beleuchten und den Laser-Leuchtfleck während der Messung über das Objekt zu bewegen. Dies ist äquivalent zur Beleuchtung mit einer großen inkohärenten Lichtquelle und führt zu den gleichen Problemen. Eine andere Möglichkeit ist, durch Erzeugung von Turbulenz in der Pupille der abbildenden Optik den Laser-Leuchtfleck auf dem Objekt statistisch tanzen zu lassen. Auch dies ist äquivalent zu den obigen Methoden und führte nicht zu den verlangten Meßgenauigkeiten im  $\mu\text{m}$ -Bereich.

Mit anderen Worten, es läßt sich keine genügend räumlich inkohärente Beleuchtung ohne den oben erwähnten Nachteil eines großen Leuchtflecks erzielen. Eine zeitlich inkohärente Beleuchtung wird zur Speckle-Reduktion erst bei sehr großen Rauhtiefen des Objektes wirksam, wie sie praktisch im Maschinenbau nicht vorkommen.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Abstandsbestimmung aufzuzeigen, bei denen die Beschränkungen des Standes der Technik eliminiert sind und mit technisch einfachen Mitteln hochgenaue Meßergebnisse erhalten werden können. Diese Aufgabe wird durch die in den Patentanspr. 1 bzw. 13 angegebenen Merkmale gelöst.

Gemäß der Erfindung wird das Objekt selbst zum Emittieren inkohärenter Strahlung angeregt. Diese tritt z. B. auf, wenn das Objekt von der Strahlungsquelle lokal so stark aufgeheizt wird, daß es thermische (Planck'sche) Strahlung emittiert. Diese ist räumlich und auch zeitlich inkohärent. Eine weitere Möglichkeit ist die Anregung von Lumineszenz, die sich aus Fluoreszenz und Phosphoreszenz zusammensetzt. Ebenfalls in Frage kommen Raman-Streuung sowie Brillouin-Streuung oder andere inkohärente Streumechanismen.

Mit einem auf dem Objekt erzeugten Leuchtfleck, der diese Art von Strahlung emittiert, gibt es keine statistische Meßunsicherheit mehr durch Speckle. Damit ist es möglich, die durch Gleichungen (2) und (3) gegebene Grenze der Meßunsicherheit auch bei punktförmiger Objektbeleuchtung um Größenordnungen zu unterschreiten.

In den Unteransprüchen sind vorteilhafte Weiterbildungen und Varianten der Erfindung angegeben. Weitere Besonderheiten und Vorzüge der Erfindung lassen sich der folgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen anhand der Zeichnung entnehmen. Es zeigen:

Fig. 1 Prinzip der Entfernungsmessung durch aktive

Trinangulation,

Fig. 2 Leuchtfleckbild, durch Speckle gestört,

Fig. 3 Durch Speckle vorgetäuschte Unebenheit einer ebenen Fläche,

Fig. 4 Prinzip der Abstandsmessung gemäß der Erfindung,

Fig. 5 Triangulationsmeßkopf,

Fig. 6 Meßfehler durch Variation der Form des Leuchtfleckbildes,

Fig. 7 Zur Abstandsmessung unabhängig von der Form des Leuchtflecks,

Fig. 8 Abstandsvermessung unabhängig von der Leuchtfleckform,

Fig. 9 Zusammenziehung mit der Zylinderlinse,

Fig. 10 Meßkopf mit virtueller Leuchtfleckverdopplung durch eine Savartplatte.

Wie in Fig. 4 gezeigt, wird durch eine geeignete kleine Lichtquelle 10 in bzw. auf dem Objekt 11 ein Leuchtfleck 2 erzeugt. Die Lichtquelle 10 kann eine thermische Quelle sein, wie eine Glühlampe, eine Gasentladungslampe, eine Leuchtdiode, ein Gas- oder Halbleiterlaser sowie eine Superlumineszenzdiode. Wesentlich ist dabei, daß die Strahlung 13 der Quelle geeignet ist, die Oberfläche des Objektes im Leuchtfleck 2 zu inkohärenter Strahlung 14 anzuregen. Viele organische Materialien zeigen z. B. Lumineszenz (Fluoreszenz und Phosphoreszenz) oder Raman-Streuung oder Brillouin-Streuung, wenn sie mit der richtigen Wellenlänge angeregt werden. Falls das Objekt keine inkohärente Strahlung emittiert, kann man die Oberfläche durch geeignete Behandlung aktivieren, z. B. durch Beschichten mit geeigneten Phosphoren 12. Oft genügen geringe organische Oberflächenverunreinigungen, um die Oberfläche zu inkohärenter Emission anzuregen.

Wenn das erfindungsgemäße Meßverfahren bei der abtragenden Bearbeitung eines Werkstücks mittels Laserstrahls eingesetzt wird, emittiert der vom Laserstrahl im bzw. auf dem Objekt erzeugte heiße Brennfleck die zur Abstandsbestimmung benötigte inkohärente Strahlung. Auch bei anderen Verfahren der Materialbearbeitung, wie dem Lichtbogenschweißen, tritt eine ausreichend hohe lokale Aufheizung der Objektoberfläche auf.

Die vom Objekt 11 emittierte räumlich inkohärente Strahlung 14 wird im Meßkopf 15 aufgefangen und ausgewertet, um den Abstand zum Objekt zu bestimmen. Dabei soll der vom Objekt 11 ebenfalls emittierte kohärente Strahlungsanteil 13 vom inkohärenten Strahlungsanteil 14 vor der Auswertung getrennt werden. Dies ist im allgemeinen durch ein optisches Farbfilter 16 möglich, weil die inkohärente Strahlung meist in einem anderen Wellenlängenbereich als die kohärente Strahlung liegt. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die spektrale Empfindlichkeit des Photoempfängers so zu wählen, daß die kohärente Strahlung 13 nicht erfaßt wird. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die anregende Strahlung 13 nach einer gewissen Zeit auszuschalten und die Auswertung der inkohärenten Strahlung 14 erst danach zu beginnen. Dies ist symbolisch durch den Schalter 17 vor der Lichtquelle 10, der durch den Meßkopf 15 gesteuert wird, dargestellt. Da die inkohärente angeregte Strahlung auch verzögert ausgesendet werden kann, je nach Wahl des angeregten Materials, kann man die inkohärente Strahlung durch ein Zeitfenster, dessen Beginn und Ende vorteilhaft einstellbar sind, bei der Auswertung ausblenden.

Es sind verschiedene Ausführungen des Meßkopfes 15 möglich, weil die Entfernungsinformation, die im

emittierten Licht steckt, auf verschiedene Weise decodiert werden kann. In Fig. 4, 5 ist ein Triangulations-Meßkopf als Beispiel dargestellt, der eine Abbildungslinse 18 und einen örtlich auflösenden Photocmpfänger, vorzugsweise eine "positionsempfindlichen Photodiode" (PSD) oder ein CCD-Photodiodenarray 19 enthält. In Fig. 5 sind die einzelnen Dioden eines solchen Arrays 19 angegeben. Der Ort des Leuchtfleckbildes, dessen Intensitätsverteilung bei Pos. 20 beispielhaft wiedergegeben ist, codiert den Abstand zum Objekt 11. Erfindungsgemäß kann der Ort des Leuchtfleckbildes nun mit extremer Genauigkeit bestimmt werden, weil die Form des Leuchtfleck-Bildes nicht durch Speckle statistisch gestört ist.

Deshalb kann man die Position des Leuchtfleckbildes auch wesentlich genauer bestimmen als seinen Durchmesser, oder auch wesentlich genauer als durch den Abstand der CCD-Photodioden gegeben. Man kann in der Auswerteeinheit 21 z. B. den Schwerpunkt des Leuchtfleck-Bildes bestimmen oder die Lage des Maximums, wobei sich diese Größen durch Subpixel-Interpolation oft genauer als auf  $1 \mu\text{m}$  in der Ebene des Photoempfängers bestimmen lassen. Die Auswertung kann in diesem Fall so erfolgen, daß die drei oder fünf höchsten Photodiodensignale benutzt werden, um eine Gaußkurve oder andere passende Kurve in die Meßwerte hineinzufitten. Die Lage des Maximums der gefitteten Kurve ist ein Maß für die Position des Leuchtfleck-Bildes. Die mögliche Genauigkeit ist jetzt nur noch im wesentlichen durch das Rauschen des Photoempfängers gegeben.

Es sind viele weitere Varianten und Ausgestaltungen des Meßkopfes denkbar, von denen noch zwei Ausführungen gezeigt werden, die erfindungsgemäß weitere Vorteile bieten.

Verfahren, die die Position eines Leuchtfleck-Bildes auswerten, sind darauf angewiesen, daß die Form dieses Leuchtfleck-Bildes unabhängig vom adressierten Ort auf dem Objekt ist und unabhängig von der Entfernung. Dies wird deutlich durch Fig. 6: Wenn das Objekt z. B. eine örtliche Änderung der Reflexion oder Emissionsfähigkeit  $R(x)$  aufweist, so sieht das Leuchtfleck-Bild für den Ort A anders aus, als für den Ort B. Eine Bestimmung des Schwerpunktes würde zu Meßfehlern führen.

Eine solche lokale Variation der Form des Leuchtfleck-Bildes, je nach dem adressierten Ort auf der Objektoberfläche kann man aber nicht ausschließen. Es kann nicht nur lokale Variation der Reflexion oder Emissionsfähigkeit vorliegen, es kann z. B. auch der Leuchtfleck selbst durch Turbulenz zeitlich und örtlich variieren. Zwar wird der Effekt i. a. klein sein, wenn der Leuchtfleck klein ist, aber wegen der unterdrückten Speckle und der damit erreichbaren hohen Genauigkeit soll auch ein Einfluß der Form des Leuchtflecks auf das Meßergebnis ausgeschlossen werden. Da bei den bekannten Verfahren das Speckle die Hauptfehlerquelle ist, war es bisher nicht notwendig, diesem Effekt Beachtung zu schenken.

Die Unabhängigkeit der Abstandsmessung von eventuellen Formvariationen des Leuchtfleck-Bildes wird erfindungsgemäß durch folgendes Verfahren gelöst, wie z. B. in Fig. 7 dargestellt.

Um Unabhängigkeit von der Form des Leuchtfleck-Bildes zu erhalten, ist es notwendig, nicht den Ort des Leuchtfleck-Bildes selbst zu bestimmen, dies ist ja nicht genau möglich, wenn seine Form auf unbekannte Weise variiert. Die Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß nicht der Ort selbst, den Abstand co-

diert, sondern die Entfernung  $s$  zwischen mindestens zwei formgleichen Bildern 25, 26 des Leuchtflecks. Damit ist es möglich, in diesen Bildern jeweils die Entfernung  $s$  zwischen charakteristischen homologen Punkten  $x_1, x_1'$ , bzw.  $x_2, x_2'$ , etc. zu finden, wie in Fig. 7 skizziert. Aus der genauen Lage der homologen Punkte, die wie oben in der Auswerteeinheit 27 beschrieben bestimmt werden kann, läßt sich dort auch der Abstand  $s$  und damit die Objektentfernung auswerten.

Die homologen Punkte können z. B. lokale Maxima oder Minima sein. Man kann aber auch den Schwerpunkt des Leuchtfleckbildes bestimmen und die Entfernung der Schwerpunkte der verschiedenen Leuchtfleckbilder bestimmen, um daraus den Objektabstand zu ermitteln. Ebenso läßt sich eine Korrelation der Leuchtfleckbilder 25, 26 durchführen und daraus auf bekannte Weise der Abstand  $s$  errechnen.

Es ist noch zu bemerken, daß sich die obige Überlegung nicht bei Formänderungen des Leuchtfleckbildes anwenden läßt, die durch Kohärenzeffekte entstehen, weil es dort nicht gelingt, die Bilder 25, 26 formgleich zu machen.

Die Grundüberlegung, Unabhängigkeit der Abstandsmessung von der Leuchtfleckform zu gewinnen, indem nicht mehr die Position, sondern die Differenz von Positionen bestimmt wird, kann auf verschiedene Weise realisiert werden. Zwei Ausführungen des Meßkopfes werden in Fig. 8 bis 10 beispielhaft angegeben.

Nachdem das Objekt über einen Teilerspiegel 28 zu inkohärenter Strahlung 14 angeregt wurde, wird diese Strahlung 14 durch das Farbfilter 16 geschickt und durch die Linse 30 gesammelt. Die Linse 30 bildet den Leuchtfleck in eine Ebene 31 ab. In der Nähe der Linse 30 steht eine Blende 32 mit mehreren Öffnungen. Als Beispiel ist in Fig. 8 eine Doppelspaltblende angegeben, aber auch mehr und anders gestaltete Öffnungen sind möglich. Der ortsempfindliche Photodetektor 19 befindet sich nicht in der Bildebene 31, sondern ist leicht defokussiert. Dadurch entstehen zwei unscharfe, nebeneinanderliegende Bilder 25, 26 des Leuchtflecks, mit einem Abstand  $s$ . Anders ausgedrückt, erhält man eine unscharfe Projektion der Blende. Der Abstand  $s$  der unscharfen Leuchtfleckbilder hängt nun von der Entfernung  $z$  des Leuchtflecks 2 von der Linse 30 ab. Die Abstandsänderung  $\Delta s$  der unscharfen Leuchtfleckbilder mit  $z$  kann leicht berechnet werden.

Es gelten folgende Symbole:

$s$  : Abstand der unscharfen Spotbilder;

$\Delta s$  : Abstandsänderung der Leuchtfleckbilder

$z$  : Entfernung des Leuchtfleckes von der Linse (Gegenstandsweite)

$b$  : Entfernung des Bildes von der Linse (Bildweite)

$D$  : Abstand der Spaltblenden in der Pupille

$A$  : Abstand der Detektorebene zur Linse

$a$  : Defokussierung (intrafokal), Abstand Detektorebene-Bildebene  $\beta$  : Abbildungsmaßstab,  $\beta = b/z$

$f$  : Brennweite der Linse.

Damit läßt sich folgende Gleichung ansetzen ( $s$ -Abb.):

$$D/b = s/a$$

durch Einsetzen von  $a = b - A$  und  $b = -z \cdot \beta$  erhält man:

$$s = D + (A \cdot D)/(z \cdot \beta).$$

Diese Gleichung wird nach  $z$  differenziert:

$$\frac{\delta s}{\delta z} = - \frac{A \cdot D}{z^2 \cdot \beta} \rightarrow \Delta s = - \frac{A \cdot D}{z^2 \cdot \beta} \Delta z \quad (*)$$

Weiterhin gilt folgende Abbildungsgleichung  $1/f = 1/b - 1/z$ . Für  $b$  wird  $-z \cdot \beta$  eingesetzt und dann nach  $z$  aufgelöst, es ergibt sich:

$$z = -f - f/\beta.$$

Einsetzen in (\*) liefert nach einigen Umformungen:

$$\Delta s = - \frac{A \cdot D}{f^2 (\beta + 2 + \beta^{-1})} \Delta z \quad (**)$$

Es ist nun bemerkenswert, daß diese relative Änderung, die ein Maß für die Empfindlichkeit des Verfahrens ist, ihr Optimum bei einem Abbildungsmaßstab von  $\beta = -1$  hat. Dies kann aus (\*\*) gezeigt werden.  $\Delta s$  wird umso größer, je kleiner der Nenner ist. Es ist also zu untersuchen, wann  $\gamma(\beta) = \beta + 2 + \beta^{-1}$  minimal wird. Dies gilt für  $\beta_0$  mit  $\gamma'(\beta_0) = 0$ . Die erste Ableitung von  $\gamma(\beta)$  ist:

$$\gamma'(\beta) = 1 - \beta^{-2}.$$

Die Nullstellen liegen bei  $\beta_0 = \pm 1$ .  $\beta = -1$  ist physikalisch relevant. Da  $\gamma''(-1)$  größer als 0 ist, wird für  $\beta = -1$  tatsächlich  $\gamma$  minimal, d. h.  $\Delta s$  wird maximal.

Dies wird erfindungsgemäß ausbeutet. Eine weitere äußerst wichtige Eigenschaft der Anordnung ist, daß die unscharfen Leuchtfleckbilder nicht spiegelsymmetrisch zur optischen Achse sind, sondern jeweils die gleiche Orientierung haben, wie in Fig. 8 gezeigt, so daß der Abstand homologer Punkte unabhängig von der Form wird.

Da die unscharfen Leuchtfleckbilder auch als unscharfe Projektion der Pupille erscheinen, sind sie im obigen Beispiel spaltförmig. Dies ist von gewissem Nachteil, da der Photodetektor dann eine so große Fläche einnehmen sollte, daß das gesamte Licht aufgefangen wird. Kostengünstiger und besser für schnellere Auswertung ist die Verwendung einer Photodiodenzeile. Eine solche kann vorteilhaft verwendet werden, mit Hilfe der zusätzlich eingefügten Zylinderlinse 33. Diese ist so orientiert, daß die unscharfen Spaltprojektionen annähernd zu einem Punkt zusammengezogen werden, wie in Fig. 9 dargestellt. Damit ist die Verwendung eines zeilenförmigen Photoempfängers, anstelle eines flächenhaften Photoempfängers ohne Verluste möglich.

Eine weitere Ausgestaltung zum Erzeugen von zwei oder mehr formgleichen Bildern des Leuchtflecks, deren gegenseitige Entfernung vom Objektstand abhängt, entsteht durch die Verwendung eines doppelbrechenden Elementes, durch das das Licht des Leuchtflecks hindurchtritt. In Fig. 10 ist ein solcher Meßkopf dargestellt:

Der Leuchtfleck 2 sendet sein Licht beispielsweise durch eine Savart-Platte 36, mit einem vorgeschalteten Polarisator 37 und einem nachgeschalteten Polarisator 38. Diese Anordnung erzeugt zwei virtuelle Doppelbilder des Leuchtflecks an den Stellen 39 und 40, im Abstand  $p$ , der durch die Savart-Platte 36 gegeben ist. Das Licht dieser Doppelbilder kommt in einer Ebene 41 hinter der Savartplatte zur Interferenz. Es sind dort Interferenzstreifen 42 zu beobachten. Der Abstand  $l$  der Interferenzstreifen hängt auf einfache Weise von der Ent-

fernung  $z$  der Meßebebene 26 vom Leuchtfleck 20 ab:  $l = z\lambda/p$ . Es ist nur noch nötig, den Abstand der Interferenzstreifen zu bestimmen, um daraus die Objektentfernung herzuleiten. Dieses Verfahren ist bekannt, jedoch bewirkt auch dort das Speckle eine Meßunsicherheit, wie in Gl. (2) und (3) gegeben. In Kombination mit der erfindungsgemäßen Anregung des Objektes, räumlich inkohärente Strahlung zu emittieren, wird hier, ebenso wie bei den anderen Ausprägungen eine Verbesserung der Genauigkeit um Größenordnungen möglich. Hier, wie auch bei der Ausprägung nach Fig. 8 hat man den zusätzlichen Vorteil der hohen Symmetrie, d. h. Beobachtung und Beleuchtung aus der gleichen Richtung, und damit geringe Fehleranfälligkeit, sowie geringe Abschattung.

Dadurch kann eine geringe Beobachtungsapertur gewählt werden. Es tritt keine Asymmetrie, wie bei der gewöhnlichen Triangulation mehr auf, die Beleuchtungsrichtung ist gleich der Beobachtungsrichtung. Es gibt nur sehr geringe Abschattung.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Abstandsmessung zwischen einem Objekt und einem Bezugspunkt, bei dem das Objekt von einer Strahlungsquelle bestrahlt wird und bei dem die vom Objekt kommende Strahlung von einem Meßkopf aufgefangen wird und daraus die Entfernung zwischen Objekt und Meßkopf bestimmt wird, dadurch gekennzeichnet, daß die Beleuchtungsquelle das Objekt lokal in einem Leuchtfleck anregt und zur Abstandsmessung die vom Leuchtfleck emittierte räumlich inkohärente Strahlung benutzt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Leuchtfleck durch lokale Erhitzung des Objektmaterials erzeugt wird und daß die vom Leuchtfleck emittierte inkohärente thermische Strahlung zur Entfernungsmessung benutzt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die vom Leuchtfleck emittierte nicht-thermische inkohärente Strahlung, vorzugsweise Lumineszenz, Fluoreszenz, Phosphoreszenz, Ramanstreuung, Brillouinstreuung, zur Entfernungsmessung benutzt wird.
4. Verfahren einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die vom Leuchtfleck kommende kohärente Strahlung von der inkohärenten Strahlung abgetrennt wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die vom Leuchtfleck reflektierte kohärente Strahlung der Strahlungsquelle durch Filter abgetrennt wird oder ein Photoempfänger benutzt wird, dessen spektrale Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich der kohärenten Strahlung gering ist.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die vom Leuchtfleck emittierte Strahlung in einem Zeitfenster, dessen Beginn und Dauer einstellbar sind, ausgewertet wird.
7. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Objektberfläche mit Materialien beschichtet wird, die bei Anregung durch die Strahlungsquelle inkohärentes Licht aussenden.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Abstand zwi-

schem dem auf dem Objekt erzeugten Leuchtfleck und einem Bezugspunkt am Meßkopf unabhängig von der Form und Position des Leuchtfleckes bestimmt wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß vom Leuchtfleck mindestens zwei nebeneinanderliegende unscharfe formdeckungsgleiche inkohärente Bilder erzeugt werden, deren Abstand ein Maß für die Entfernung ist, und daß die Entfernung aus dem Abstand der homologen Punkte in den formdeckungsgleichen Bildern des Leuchtfleckes ermittelt wird.

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß zur Entfernungsmessung der Abstand der Schwerpunkte der formdeckungsgleichen Bilder des Leuchtfleckes ausgewertet wird.

11. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß durch Interpolation das Maximum der jeweiligen Bilder des Leuchtfleckes mit Sub-Pixel-Genauigkeit bestimmt wird und aus der Entfernung dieser Maxima der Objektabstand bestimmt wird.

12. Verfahren nach Anspruch 1—8, dadurch gekennzeichnet, daß die Achse der Beleuchtungseinrichtung mit der Achse der Beobachtungsrichtung übereinstimmt.

13. Vorrichtung zur Abstandsmessung, bestehend aus einer Strahlungsquelle, die das Objekt bestrahlt, einem Meßkopf, der das vom Objekt kommende Licht auffängt und der Rechenelemente enthält, die aus dem aufgefangenen Licht den Abstand zwischen Objekt und Meßkopf errechnen, dadurch gekennzeichnet, daß die Strahlungsquelle (10) zur Erzeugung eines lokalen Leuchtfleckes (2) auf dem Objekt (11) ausgebildet ist, der eine räumlich inkohärente Strahlung emittiert, und daß die optischen Elemente (16), (18) und die Rechenelemente (20) des Meßkopfes (15) aus der aufgefangenen inkohärenten Strahlung (14) den Abstand zwischen dem Meßkopf (15) und dem Leuchtfleck (2) ermitteln.

14. Vorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Strahlungsquelle das Objekt zur Emission thermischer Strahlung anregt.

15. Vorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Beleuchtungsquelle das Objekt zur Emission nichtthermischer Strahlung anregt, vorzugsweise zu Lumineszenz, Fluoreszenz, Phosphoreszenz, Ramanstreuung, Brillouinstreuung.

16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 13 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß der Meßkopf (15) elektrische Beulelemente enthält, die die vom Objekt emittierte Strahlung in einem Zeitfenster auswerten, dessen Beginn relativ zum Zeitpunkt der Anregung des Objektes und dessen Dauer einstellbar ist.

17. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 13 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß der Meßkopf (15) optische Elemente und Rechenelemente enthält, die den Abstand unabhängig von der Form und Position des Leuchtfleckes ermitteln.

18. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 13 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß der Meßkopf optische Elemente zur Erzeugung von mindestens zwei im wesentlichen formgleichen auch unscharfen Bildern des Leuchtfleckes enthält, sowie Auswerteelemente, die einen Punkt in einem dieser Bilder bestimmen und den Abstand zum entsprechenden ho-

mol gen Punkt in den anderen Bildern ermitteln und eine Auswerteeinrichtung, die daraus die Entfernung zum Objekt errechnet.

19. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 13 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß der Meßkopf eine Anordnung von Abbildungselementen und eine Anordnung von mehreren Blenden enthält, die mehrere formgleiche ggf. unscharfe Bilder des Leuchtfleckes erzeugt, deren Zwischenabstand  $s$  dem zu messenden Abstand proportional ist.

20. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 13 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Beleuchtungsquelle ein Laser ist.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

Nummer:

Int. Cl.<sup>8</sup>:

Offenlegungstag:

DE 42 05 489 A1

G 01 B 11/14

16. September 1993

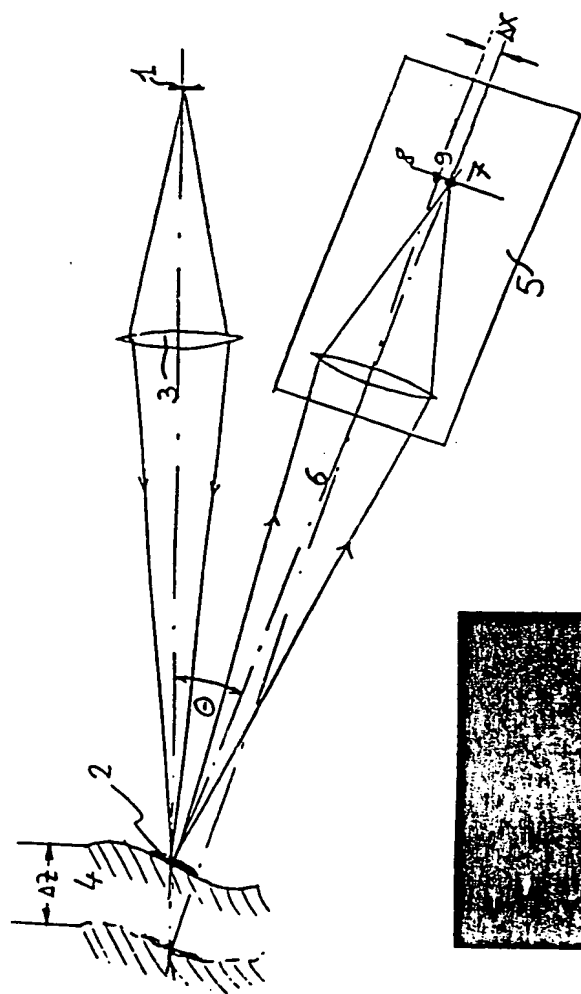


FIG. 1

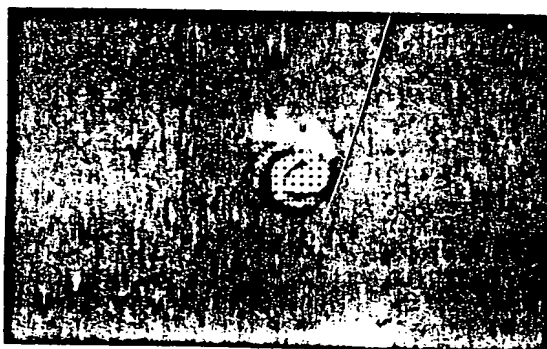


FIG. 2

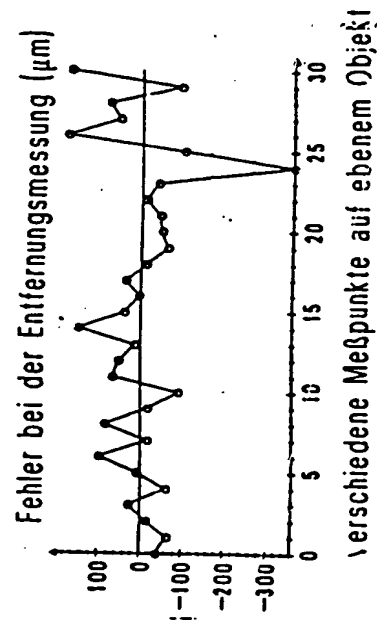
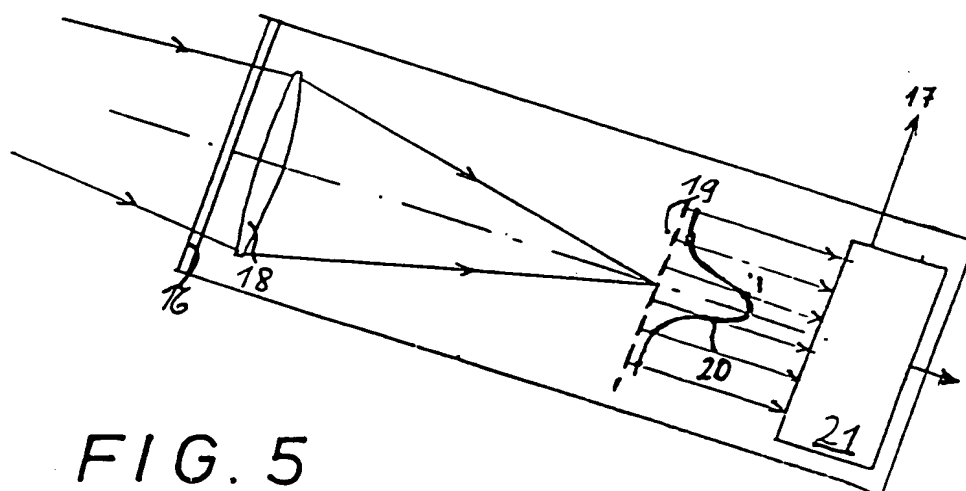
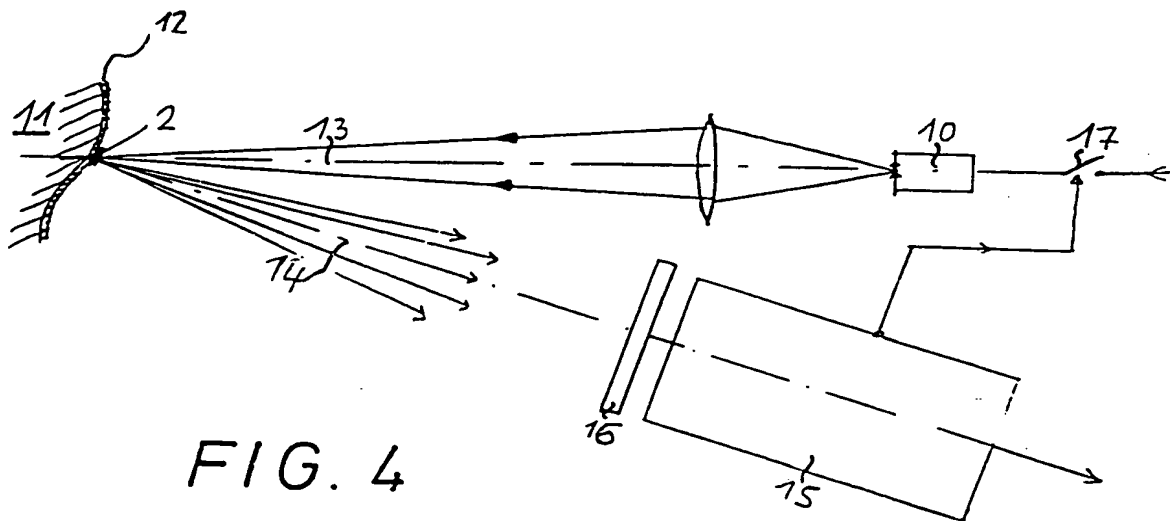
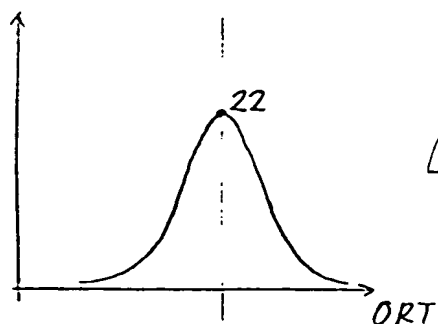


FIG. 3



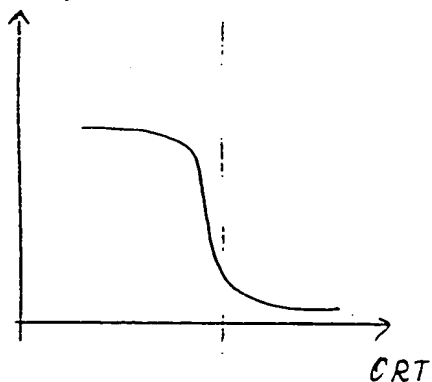


BESTRAHLUNGSSTÄRKE



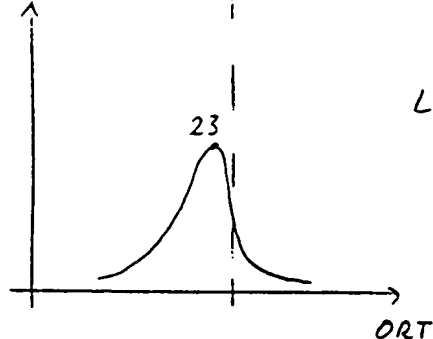
LEUCHTFLECK

EMISSIONSFÄHIGKEIT R



EMISSIONS-  
FÄHIGKEIT

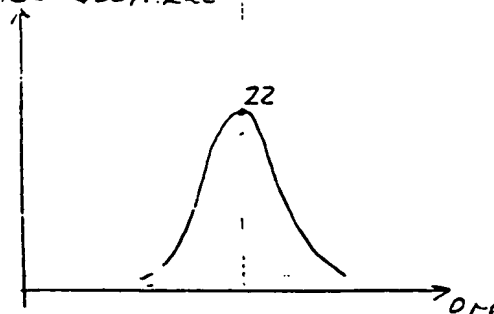
BESTRAHLUNGSSTÄRKE



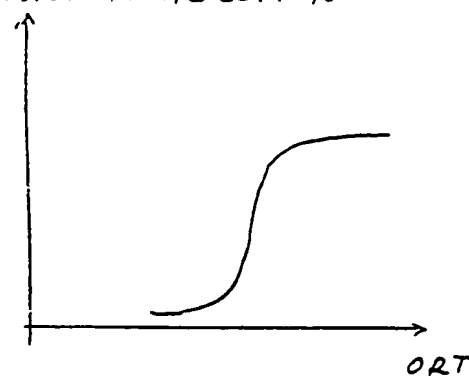
LEUCHTFLECKBILD

Fall A

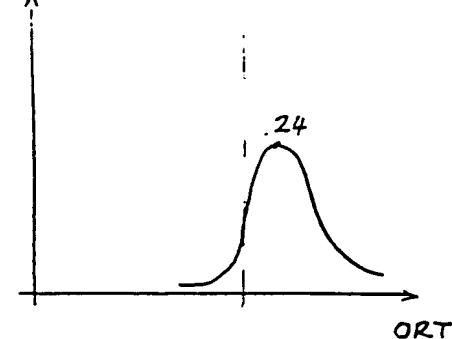
BESTRAHLUNGSSTÄRKE



EMISSIONSFÄHIGKEIT R



BESTRAHLUNGSSTÄRKE



Fall B

FIG. 6

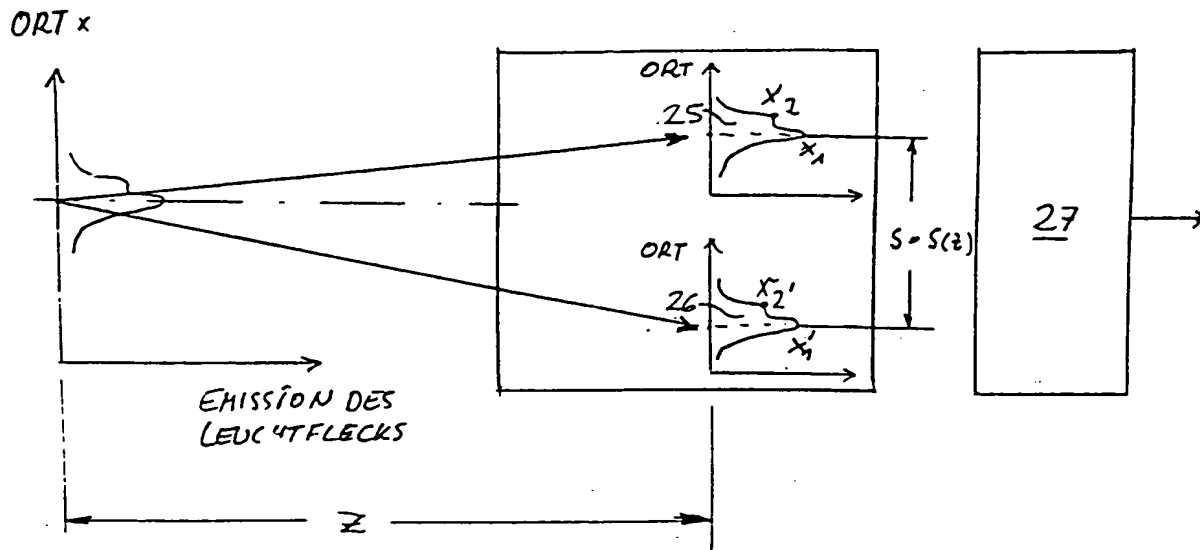


FIG. 7

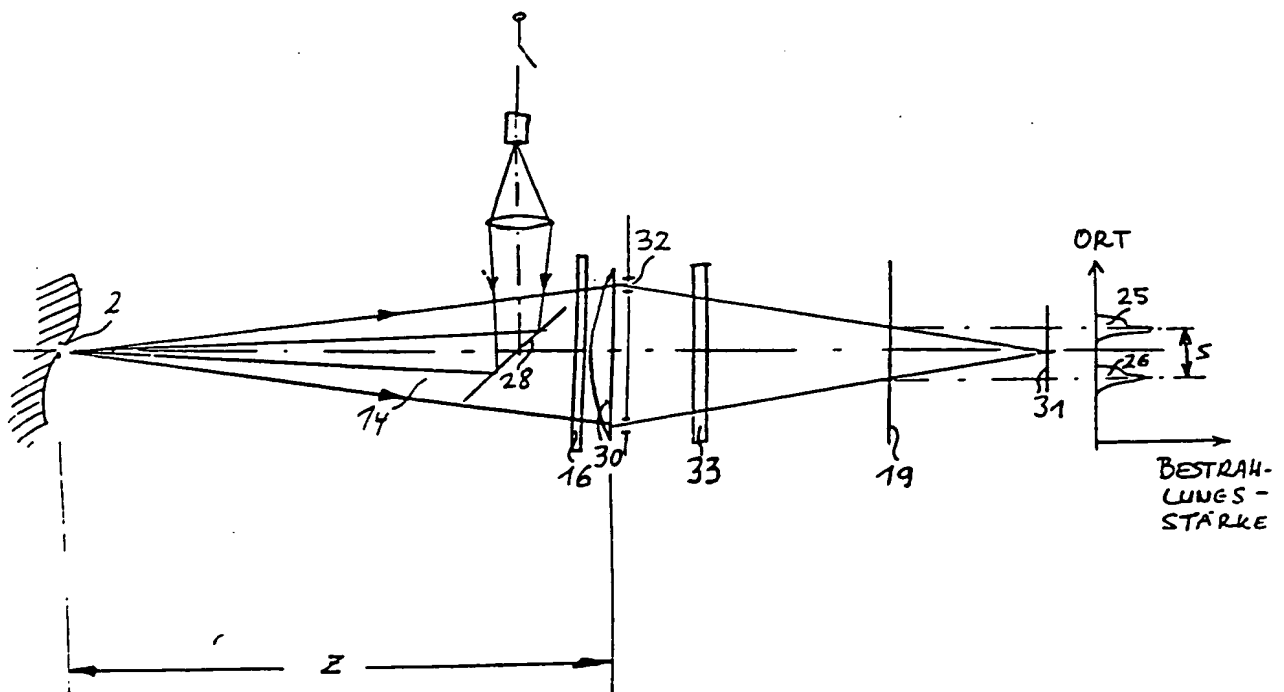


FIG. 8

FIG. 9

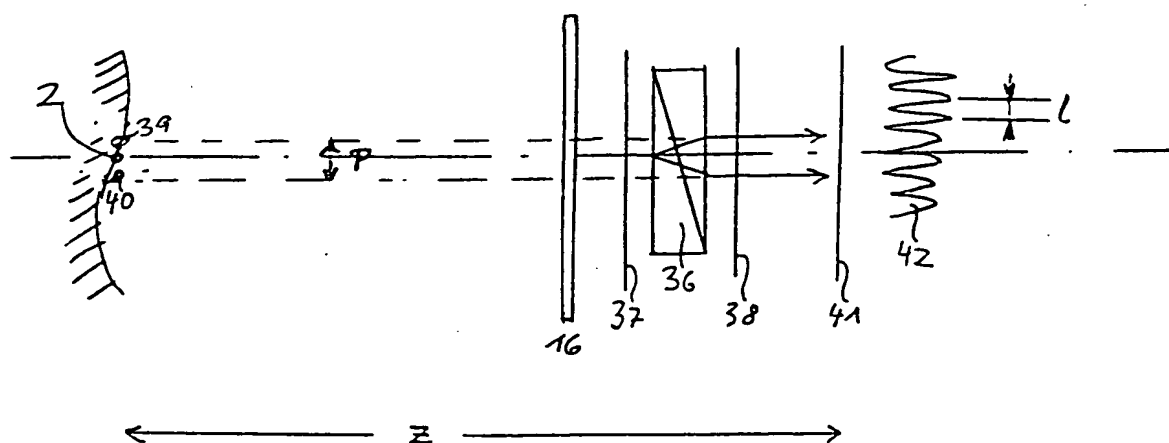
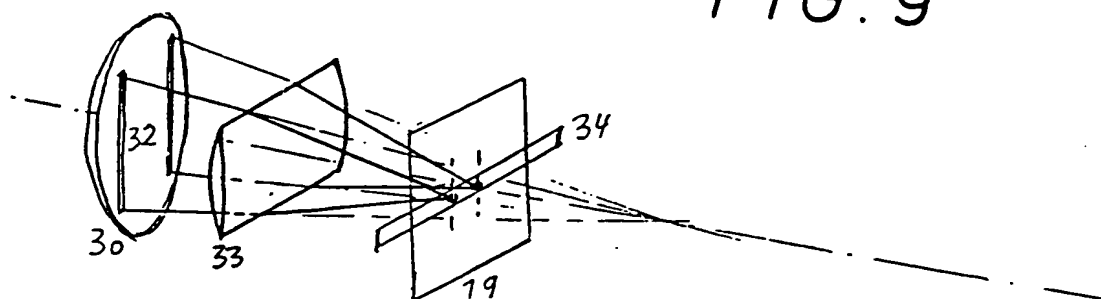


FIG. 10